中国生态农业学报 2017 年 2 月 第 25 卷 第 2 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Feb. 2017, 25(2): 247−257
ChinaXiv合作期刊

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160772

吴林, 刘兴冉, 闵雷雷, 沈彦俊, 刘峰贵, 周晓旭. 黑河中游绿洲区玉米冠层阻抗的环境响应及模拟[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 247−257
Wu L, Liu X R, Min L L, Shen Y J, Liu F G, Zhou X X. Response of maize canopy to environmental factors in the middle reach oasis of Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 247−257

黑河中游绿洲区玉米冠层阻抗的环境响应及模拟*

吴 林[1,2], 刘兴冉[2], 闵雷雷[2], 沈彦俊[2**], 刘峰贵[1], 周晓旭[2]

(1. 青海师范大学生命与地理科学学院 西宁 810008; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心农业水资源重点实验室 石家庄 050022)

摘 要: 蒸散发(ET)是区域能量平衡以及水量平衡的关键环节, 精确估算蒸散发, 对于提高水分利用效率以及优化区域用水结构具有重要意义, 而冠层阻抗则是准确估算蒸散发的一个重要变量。为了确定冠层阻抗模型区域适用性、解决其参数化问题, 本研究基于黑河重大研究计划已有的通量观测数据, 以 Irmak 模型为基础, 考虑微气象因子与冠层阻抗之间的关系, 增加了大气 CO_2 浓度对冠层阻抗的影响, 构建了未考虑 CO_2 和考虑 CO_2 影响的两种 Irmak 模型, 并将其与 Penman-Monteith(P-M)模型耦合, 利用已有涡度相关数据, 分析和检验了两种冠层阻抗模型对环境变量和大气 CO_2 浓度响应的模拟结果, 并对模型参数进行敏感性分析。结果表明: 将考虑大气 CO_2 浓度影响的 Irmak 模型与 Penman-Monteith 模型耦合, 能够更好地模拟玉米冠层阻抗和蒸散量对外部环境变量的响应过程。在参数率定期该模型所模拟的冠层阻抗和蒸散量与实测值之间的 R^2 分别达 0.76 和 0.95, RMSE 分别达 33.1 $s\cdot m^{-1}$ 和 34.5 $W\cdot m^{-2}$; 模型验证期冠层阻抗和蒸散量模拟值与实测值之间的 R^2 分别达 0.68 和 0.90, RMSE 分别达 63.2 $s\cdot m^{-1}$ 和 49.0 $W\cdot m^{-2}$。两个独立验证点结果表明考虑了大气 CO_2 浓度影响的 Irmak 模型具有较好的空间可移植性和适应性, 模型能够较为准确地模拟玉米在整个生长季半小时时间尺度上的农田耗水过程。敏感性分析表明玉米冠层阻抗及其蒸散量对净辐射和相对湿度变化最为敏感, 其次是气温、叶面积指数和大气 CO_2 浓度。本文所构建的考虑大气 CO_2 浓度对于玉米冠层阻抗影响的 Irmak 模型能够较为准确地估算作物蒸散量, 并可为种植结构调整、土地利用方式改变以及大气 CO_2 浓度变化环境下的农田耗水研究提供一定的研究依据。

关键词: 冠层阻抗; 蒸散发; Penman-Monteith 模型; Irmak 模型; 大气 CO_2 浓度
中图分类号: S161.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)02-0247-11

Response of maize canopy to environmental factors in the middle reach oasis of Heihe River Basin*

WU Lin[1,2], LIU Xingran[2], MIN Leilei[2], SHEN Yanjun[2**], LIU Fenggui[1], ZHOU Xiaoxu[2]

(1. College of Biologic and Geographic Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) is critical for energy and water balance in agricultural systems. Accurate estimation or

* 国家自然科学基金(91425302, 31400375)资助
** 通讯作者: 沈彦俊, 主要从事生态水文过程研究。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
吴林, 主要研究方向为生态水文过程研究。E-mail: wulinmsn@163.com
收稿日期: 2016-08-31 接受日期: 2016-10-12

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (91425302, 31400375).
** Corresponding author, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn
Received Aug. 31, 2016; accepted Oct. 12, 2016

chinaXiv:201711.02121v1

ChinaXiv合作期刊

measurement of ET is therefore important in improving water use efficiency and optimizing the structure of regional water use. Canopy resistance is one of the most important variables in the estimation of ET. The accuracy of simulation of the response process of canopy resistance to environmental variables is critically important for crop ET research. A convenient approach to simulate the response process of canopy resistance to multiple factors is based on the relationship between measured latent heat, climatic variables and by using the modified Penman-Monteith (P-M) equation. However, this method has certain limitations in some practical applications due to the lack of a few effective parameters. Another approach is to construct empirical and semi-empirical models using multiple factors (such as the Irmak model) based on measured data combined with the rearranged P-M equation. Based on canopy resistance values calculated by the rearranged P-M equation and on maize data (for the period May to September 2012) collected from the three eddy covariance observation stations in Heihe River Basin, this study constructed Irmak model taking into account the effect of atmospheric CO_2 concentration of half-hourly and daily time-steps to simulate the response processes of maize to environmental variables such as net radiation (R_n), air temperature (T_a), leaf area index (LAI), relative humidity (RH), wind speed (U_3), aerodynamic resistance (r_a), effective soil water content (θ) and atmospheric CO_2 concentration. In the study, the performance of the two Irmak models were tested with measured values of latent heat from the eddy covariance systems of the other two verification points. Besides, the sensitivity of environmental variables was analyzed. The results indicated that the improved Irmak model which took into account the effect of atmospheric CO_2 concentration well estimated canopy resistance and ET. The coefficients of determination (R^2) for canopy resistance and ET were respectively 0.76 and 0.95 for the calibration phase, with root mean square errors (RMSE) of 33.1 $s \cdot m^{-1}$ and 34.5 $W \cdot m^{-2}$. Meanwhile, R^2 for canopy resistance and ET were respectively 0.68 and 0.90 for the validation phase, with RMSE of 63.2 $s \cdot m^{-1}$ and 49.0 $W \cdot m^{-2}$. The two verification points showed that the improved Irmak model had a good performance and strong regional applicability and spatial portability. The model also simulated the response processes of canopy resistance to environmental variables and reflected the effect of the variations in atmospheric CO_2 concentration on ET. Sensitivity analysis of the improved Irmak model showed that canopy and ET were the most sensitive to net radiation and relative humidity, followed by air temperature, leaf area index and atmospheric CO_2 concentration. The improved Irmak model used in this study was applicable in estimating crop water consumption and the accuracy of ET of maize, in providing scientific basis for improvements in water use efficiency and in optimizing the structure of regional water use under increased future atmospheric CO_2 concentration.

Keywords: Canopy resistance; Evapotranspiration (ET); Penman-Monteith (P-M) model; Irmak model; Atmospheric CO_2 concentration

chinaXiv:201711.02121v1

植物叶片上的气孔是植物体进行体内外气体交换的通道，气孔的开闭行为会影响植物体的蒸腾以及光合作用。植物组织中的水分通过蒸腾作用进入大气，从而实现植被与外界的能量交换[1]，该过程受到外部环境因子和植物生理等因素的共同控制和调节[2]。冠层阻抗是水分在作物冠层与大气进行循环所需要克服的阻力，如何更为准确地模拟冠层阻抗，对于精准估算蒸散发(ET)，进而对于提高水分利用效率和优化区域用水结构具有重要意义[3-6]。

许多经验和半经验的模型被用来估算冠层阻抗对环境变量的响应过程，例如 Jarvis 模型、双源耦合模型、Irmak 模型、S-W 模型、K-P 模型等[1,7-12]。其中最为典型的 Jarvis 模型将冠层阻抗看成是外部环境变量胁迫的结果，建立了形式简单灵活的冠层阻抗模型[11]，但生理意义不明确，未考虑各因子之间的相互作用，模型的复杂性随着外部环境变量的增多而增加，模型精度随着模拟时间的延长而降低，尤其是最小冠层阻力的确定较为困难[13]。Li 等[6,14-15]基于石羊河流域大量试验所建立的耦合了土壤蒸发和植被蒸腾的耦合模型，对玉米(*Zea mays*)和酿酒葡萄(*Vitis vinifera*)均具有较好的模拟效果，但模型参数较多，个别参数不易获取[6]，部分参数需要试验数据进一步修正，模型精度在作物叶面积指数(LAI)较低情况下仍受到限制。Irmak 等[10]利用多年观测资料，考虑微气象因子与冠层阻抗之间的关系，采用广义非线性回归方法设计了 7 个模型，模型的复杂性随着微气象因子的增多而增加，该模型虽为生理意义不明确的经验模型，但形式简洁，计算简单，使用方便快捷。Irmak 等[5]利用其构建的阻抗模型对玉米的冠层阻抗及蒸散量进行模拟，在后来的研究中又利用该模型对大豆(*Glycine max*)的冠层阻抗和蒸散量进行模拟[10]，模拟精度很高，然而模型的适应性和可移植性有待于进一步研究。

众多研究成果[2,5,11-17]表明以上模型均具有较好的模拟效果以及较高的适用性，许多新模型在此基础上进行了修正和改进，考虑的因子也更加全面，但这些模型忽略了大气 CO_2 浓度对冠层阻抗的影响[5]。现有气候变化条件下，由于大气 CO_2 浓度日变化幅度较小，对冠层阻抗的影响轻微，但从长期模型预测的角度考虑，尤其是在未来气候和生态系统水碳平衡变化的模拟预测中，考虑大气 CO_2 浓度变化对蒸散量的影响更加重要。现有试验表明大气 CO_2 浓

ChinaXiv合作期刊

度的改变会影响植物体与外界水气通量交换，大气 CO_2 浓度增加，会导致许多植物的气孔导度下降[18-21]，冠层阻抗增加，蒸腾作用减弱，尤其是高浓度 CO_2 能诱导气孔关闭[22-26]。Wand 等[27]研究发现 CO_2 浓度加倍时，C_4 和 C_3 作物的气孔导度分别降低 29%和 24%。在全球变化背景下，大气 CO_2 浓度上升和水资源短缺已经对区域农业的可持续发展产生了重要影响[28]，因此考虑 CO_2 浓度对冠层阻抗的影响，对于揭示植物光合作用和耗水规律，提高水分利用效率具有重要意义[22]。

本研究以 Irmak 模型为基础，基于 Morison 等[29]和 Easterling 等[30]关于 CO_2 浓度升高情景下作物的响应规律研究，假设大气 CO_2 浓度对玉米叶片气孔导度的影响呈线性趋势，考虑叶面积指数(LAI)、净辐射(R_n)、相对湿度(RH)、气温(T_a)、土壤有效含水量(θ)、空气动力学阻抗(r_a)、3 m 高度处风速(U_3)和大气 CO_2 浓度等与冠层阻抗之间的关系，构建了考虑 CO_2 浓度和未考虑 CO_2 浓度影响的冠层阻抗模型，并将其与 Penman-Monteith 模型耦合，确定模型在区域上的适用性及其参数化问题。利用“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划已有的通量观测数据，建立冠层阻抗与环境因子之间的关系，重点考虑了大气 CO_2 浓度对冠层阻抗的影响，筛选出能够反映 CO_2 浓度变化环境下的冠层阻抗模型，以期为揭示作物耗水规律，精准估算作物蒸散量，提高水分利用效率以及作物蒸散量在未来大气 CO_2 浓度上升条件下的响应机制提供一定的科学依据。

1　研究区概况、数据处理与模型简介

1.1　研究区概况

黑河流域(图 1)位于河西走廊中部，地处青藏高原与内蒙古高原的过渡地带，是我国西北干旱半干旱区第二大内陆河流域，流域面积约 14.3×10^4 km^2。该流域气候干燥，降水稀少，水资源分配不均。流域主要分为上游祁连山地，中游走廊绿洲平原以及下游阿拉善高原 3 个地貌类型区。黑河中游是指黑河干流出山口莺落峡以下至正义峡之间的地势平坦区域，为典型的温带大陆性气候，年降水量为 116.8 mm，年蒸发强度 2 365.6 mm，年平均气温 7.6 ℃。7 月到 9 月的降水量占全年降水量的 60%左右，冬季降水量仅占 3%，年降水量随着海拔高度增加和距河流距离增加而逐渐减少。年日照时数 3 085 h，无霜期 165 d。中游绿洲区耕地面积占全流域耕地总面积的 95%，水资源消耗占全流域的 68%，农田蒸散为水资源消耗的主要项，玉米为当地主要农作物之一[4]。

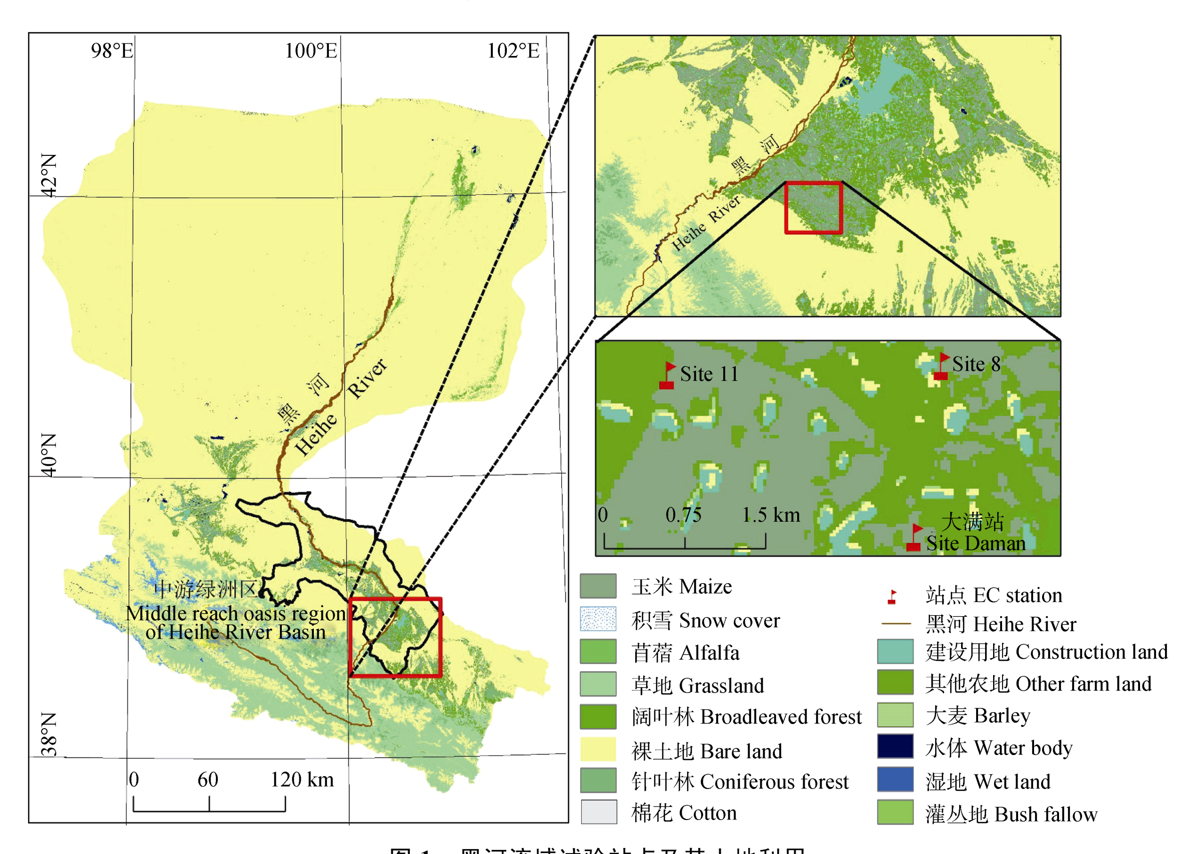


图 1　黑河流域试验站点及其土地利用

Fig. 1　Experimental sites and its' land use types in Heihe River Basin

chinaXiv:201711.02121v1

ChinaXiv合作期刊

1.2 数据来源与处理

本研究所采用的自动气象站、通量、作物株高等数据均来源于黑河计划数据管理中心(http://heihedata.org/)，通量观测矩阵中的Site 8(100°22′35″E，38°52′21″N；1 550.06 m)用于模型参数的率定，Site 11(100°20′31″E，38°52′12″N；1 575.65 m)、大满站(100°22′20″E，38°51′20″N；1 556.06 m)的数据用于模型的验证(图1)，每个通量观测系统主要由三维超声风温仪(CSAT3, Campbell Scientific, USA)和开路CO_2/H_2O红外气体分析仪(Li-7500A, Li-Cor Inc., USA)组成，原始数据采样频率为10 Hz，每30 min输出1组平均通量值以及10 Hz原始数据[31]。3个通量观测站点下垫面作物均为玉米，玉米种植垄距为50.8 cm，行距为43.3 cm，株距为22 cm。玉米株高由实测数据进行3次样条插值内插到每半小时；叶面积指数(LAI)来源于美国国家航天局(NASA)发布的MCD15A3H叶面积指数产品(https://search. earthdata.nasa.gov/)，该数据为4 d合成的500 m分辨率的L4级叶面积指数数据，采用3次样条插值法均匀内插到每天，并假设同一天不同时刻叶面积指数不发生变化。研究时间序列为整个作物生长季数据(2012年5月初—2012年9月底)，时间段为9:00— 18:30。原始涡度相关仪器信息及数据处理见文献[31]，原始涡度相关数据已经过野点剔除、延迟时间校正、坐标旋转、响应频率修正和严格的质量控制等步骤，但还需要对部分原始数据进行再处理[32]，处理规则如下：1)对原始涡度相关数据进行能量闭合度检查，将能量闭合度超出0.5~1.5之间的数据剔除，其余能量未闭合的数据进行强制闭合，闭合方法见[33]；2)去除有空值的数据；3)剔除异常数据，如实测的潜热通量(LE)<0，r_{c_ob}>2 000或r_{c_ob}<0(r_{c_ob}为利用Penman-Monteith公式反推的冠层阻抗值，此处定义为实测值)。

1.3 模型简介

1.3.1 Irmak模型

基于Irmak所构建的模型[5,10]，考虑叶面积指数(LAI)、净辐射(R_n)、相对湿度(RH)、气温(T_a)、土壤有效含水量(θ)、空气动力学阻抗(r_a)、3 m高度处风速(U_3)和大气CO_2浓度(CO_2)等外部环境变量对冠层阻抗的影响，构建了有CO_2浓度影响和无CO_2浓度影响的冠层阻抗模型，形式如下：

$$r_{c\text{-}I1} = \exp[a + bR_n + cT_a + d\text{RH} + eU_3 + gr_a + h\text{LAI} + if(\theta)] \tag{1}$$

$$r_{c\text{-}I2} = \exp\left[\begin{matrix} a + bR_n + cT_a + d\text{RH} + \\ eU_3 + gr_a + h\text{LAI} + if(\theta) \end{matrix}\right] / f(CO_2) \tag{2}$$

$$f(\theta) = (\theta - \theta_w)/(\theta_f - \theta_w) \tag{3}$$

$$f(CO_2) = 1 + \left(1 - \frac{CO_2}{330}\right) \times \Delta g_L CO_2 \tag{4}$$

式中：r_{c-I1}和r_{c-I2}分别为在Irmak模型的基础上未考虑大气CO_2浓度影响和考虑了大气CO_2浓度影响的冠层阻抗模型；$f(\theta)$为土壤含水量；$f(CO_2)$为CO_2浓度胁迫函数，式(4)中$\Delta g_L CO_2$为CO_2浓度增加1倍时，叶片气孔导度减小的倍数[30]，本研究取0.3；θ_f为田间持水量，取0.34 $cm^3 \cdot cm^{-3}$；θ_w为萎蔫系数，取0.1 $cm^3 \cdot cm^{-3}$；a、b、c、d、e、g、h、i均为待率定的经验系数。

1.3.2 Penman-Monteith模型

Penman-Monteith模型是Monteith在Penman模型的基础上发展而来，模型如下：

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + C_p \rho_a \text{VPD} / r_a}{\Delta + \gamma + \gamma \times r_c / r_a} \tag{5}$$

由公式(5)可以得出：

$$r_{c_ob} = \frac{r_a \left[\Delta(R_n - G) + \frac{C_p \times \rho_a \times \text{VPD}}{r_a} - \lambda ET \times (\Delta + \gamma)\right]}{\gamma \times \lambda ET} \tag{6}$$

式中：r_{c_ob}为利用Penman-Monteith公式反推得到的冠层阻抗；λ为汽化潜热，$J \cdot kg^{-1}$；ET为实际蒸散量，$W \cdot m^{-2}$；Δ为饱和水汽压与温度关系曲线斜率，kPa·℃$^{-1}$；R_n为净辐射，$W \cdot m^{-2}$；G为土壤热通量，$W \cdot m^{-2}$；C_p为空气定压比热，$J \cdot kg^{-1} \cdot$℃$^{-1}$；ρ_a为空气密度，$kg \cdot m^{-3}$；VPD为饱和水汽压差，kPa；r_c为冠层阻抗，$s \cdot m^{-1}$；r_a为空气动力学阻抗，$s \cdot m^{-1}$；γ为干湿表常数，kPa·℃$^{-1}$。空气动力学阻抗计算如下[1]：

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}}\right] \ln\left[\frac{Z_h - d}{Z_{oh}}\right]}{K^2 U_Z} \tag{7}$$

式中：r_a为空气动力学阻抗，$s \cdot m^{-1}$；Z_m为测风速高度，m；Z_h为测湿度高度，m；d为零平面位移，m，d=2/3 h；h为作物高度，m；Z_{om}为控制动量传递的粗糙长度，m，Z_{om}=0.123 h；Z_{oh}为控制热通量和水汽传输的粗糙长度，m，Z_{oh} =0.1 Z_{om}；K为卡曼常数，0.41；U_z为Z高度处的风速，$m \cdot s^{-1}$；本文中Z_m=3 m，Z_h=5 m。

1.4 模型评价

本文采用决定系数(R^2)，均值偏移误差(mean bias error, MBE)以及均方根误差(root mean square error, RMSE)来评价模型模拟值(E_m)与实测值(O_{ob})之间的差异，检验模型模拟精度。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_{obi} - E_{mi})^2}{\sum_{i=1}^{n}[(O_{obi} - \overline{O_{ob}})^2 + (E_m - \overline{O_{ob}})^2]} \tag{8}$$

chinaXiv:201711.02121v1

ChinaXiv合作期刊

$$\mathrm{MBE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_\mathrm{m} - O_\mathrm{ob}) \tag{9}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\left\{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_\mathrm{m} - O_\mathrm{ob})^2\right\}} \tag{10}$$

式中：E_m 为模拟值，O_ob 为实测值，$\overline{O_\mathrm{ob}}$ 为实测值的平均值，n 为样本容量。本文中约定利用涡度相关实测的潜热通量并结合 Penman-Monteith 公式反推得到的冠层阻抗为玉米冠层阻抗的实测值($r_{\mathrm{c_ob}}$)，利用模型拟合的冠层阻抗为模拟值($r_{\mathrm{c_m}}$)，利用涡度相关实测的潜热通量为 ET 的实测值($\mathrm{ET_{_ob}}$)，利用模型模拟的 ET 为模拟值($\mathrm{ET_{_m}}$)。

2　模型模拟效果与验证

2.1　模型参数率定及验证

本研究将 Site 8 点的数据(数据时段为 2012 年 6 月 6 日—9 月 20 日)分成前后两部分，前一部分数据的观测时段为 6 月 6 日—8 月 5 日，用于模型参数率定；后一部分数据的观测时段为 8 月 6 日—9 月 20 日，用于模型参数验证，将参数率定期的数据分别代入所构建的两个 Irmak 模型中，采用最小二乘法进行非线性回归，率定模型参数，建立冠层阻抗 r_c 与外部环境因子之间的经验公式；并采用验证期的数据对所建立的模型进行验证，最终得到相关参数的优选值见表 1。为了进一步检验模型在整个作物生育期内的模拟精度，采用 Site 11 和大满两个站点作为进一步的验证点。

2.1.1　Irmak 模型及其改进形式的模拟效果

利用所构建的未考虑 CO_2 浓度($r_{\mathrm{c_I1}}$)和考虑 CO_2($r_{\mathrm{c_I2}}$)的两个模型，分别对 Site 8 的玉米冠层阻抗及蒸散量进行模拟，模型相关参数见表 1，模型对比结果见图 2 和图 3。

表 1　未考虑 CO_2 浓度($r_{\mathrm{c_I1}}$)和考虑 CO_2 浓度($r_{\mathrm{c_I2}}$)的 Irmak 模型中相关参数的最优值

Table 1　Optimum values of parameters of the two Irmak models non-considering and considering CO_2 concentration

参数 Parameter	a	b	c	d	e	g	h	i
$r_{\mathrm{c_I1}}$ model (without CO_2)	7.650	−0.003	0.016	−0.027	−0.036	−0.004	−0.083	−0.468
$r_{\mathrm{c_I2}}$ model (with CO_2)	8.022	−0.003	0.009	−0.028	−0.035	−0.004	−0.044	−0.742

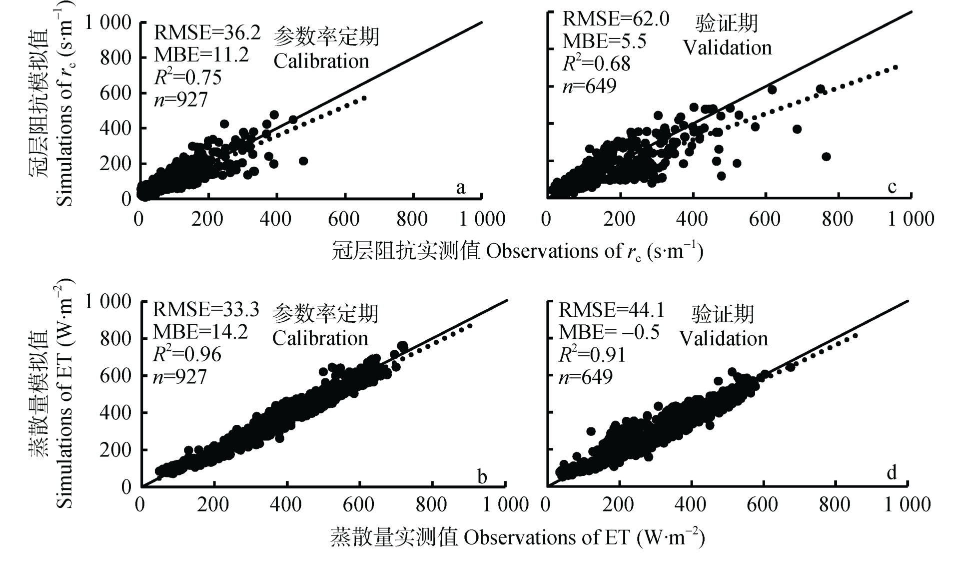


图 2　未考虑大气 CO_2 浓度的 Irmak 模型($r_{\mathrm{c_I1}}$ model)在参数率定期(a, b)和验证期(c, d)对冠层阻抗(a, c)和蒸散量(b, d)的模拟效果

Fig. 2　Simulation results of canopy resistance (a, c) and evapotraspiration (b, d) with Irmak model non-considering CO_2 concentration ($r_{\mathrm{c_I1}}$ model) in the phases of calibration (a, b) and validation (c, d)

由图 2 和图 3 可知，未考虑大气 CO_2 浓度和考虑大气 CO_2 浓度的两个模型均能够较为准确地反映玉米冠层阻抗和蒸散量的变化规律，模拟值与实测值具有较高的一致性。在考虑了 LAI、R_n、RH、T_a、r_a、U_3、θ 的基础上，增加大气 CO_2 浓度影响的 $r_{\mathrm{c_I2}}$ 模型具有更高的模拟精度。参数率定期 $r_{\mathrm{c_I2}}$ 模型所模拟的冠层阻抗和蒸散量与实测值之间的 R^2 分别达 0.76 和 0.95，RMSE 分别达 33.1 s·m^{-1} 和 34.5 W·m^{-2}，模型验证期冠层阻抗和蒸散量模拟值与实测值之间的 R^2 分别达 0.68 和 0.90，RMSE 分别达 63.2 s·m^{-1} 和 49.0 W·m^{-2}，模型精度也较 $r_{\mathrm{c_I1}}$ 模型略有提高，由于早晨和下午的水汽压差以及可用能量相对较小，使得冠层阻抗变化较大甚至出现部分异常值[34]，降低了模型对冠层阻抗的模拟精度，但误差均在可接受范围内。

chinaXiv:201711.02121v1

ChinaXiv合作期刊

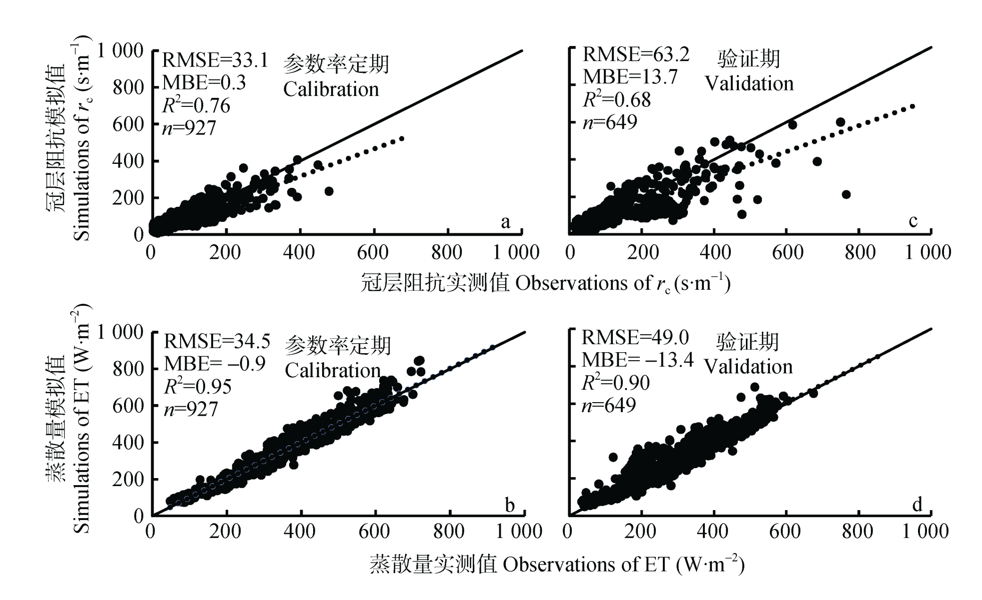


图 3 考虑大气 CO_2 浓度的 Irmak 模型(r_{c_I2} model)在参数率定期(a, b)和验证期(c, d)对冠层阻抗和蒸散量的模拟效果
Fig. 3 Simulation results of canopy resistance (a, c) and evapotraspiration (b, d) with Irmak model considering CO_2 concentration (r_{c_I2} model) in the phases of calibration (a, b) and validation (c, d)

chinaXiv:201711.02121v1

综上，考虑了大气 CO_2 浓度影响的 r_{c_I2} 模型能够较为精确地模拟玉米冠层阻抗对环境变量的响应过程，得到较高的模拟精度，模型形式简单，模型参数也较为容易获取。在诸如 Jarvis 等模型中，包含许多经验性质的参数，这些参数会随着植物的生理结构、气象要素的变化而发生变化，但 Irmak 模型能够通过农田主要微气象因子较为全面地反映冠层阻抗对环境变量的响应过程，从而实现蒸散发从叶片尺度提升至冠层尺度的转换[5,10,15]，尤其是 r_{c_I2} 模型在考虑了大气 CO_2 浓度的影响之后能够更为真实而全面地反映冠层阻抗对环境变量的响应过程，实现尺度转换。

2.1.2 模型的进一步验证

本文所构建的两个模型均将玉米的整个生育期数据分为参数率定期和模型验证期两部分，但是在作物整个生育期内，植物的生理结构、气象要素等会发生变化，基于作物生长前期数据所建立的模型对于作物生长后期乃至整个作物生长季是否适用，在不同地点不同气象要素条件下，模型适应性如何，模型参数是否具有可移植性等问题仍是限制模型能否实现尺度转换和移植的关键。为了检验两个 Irmak 模型的适应性和参数可移植性，利用通量观测矩阵中另外两个站点(Site 11 和大满站)2012 年玉米整个生育期实测的有效数据，对所建立的冠层阻抗模型做进一步验证，模拟值与实测值对比结果见图 4、图 5、图 6 和图 7。

从图 4 和图 5 可知，两个模型均能够较好地模拟 Site11 站点玉米生育期内冠层阻抗和蒸散量对环境变量的响应过程，模拟值与实测值之间较为一致，考虑了大气 CO_2 浓度影响的 r_{c_I2} 模型所模拟的冠层阻抗与蒸散量模拟值和实测值之间的 R^2 分别达 0.62 和 0.93，RMSE 分别达 94.1 s·m^{-1} 和 67.4 W·m^{-2}。对比图 4c 和图 5c 可以看出，r_{c_I2} 模型模拟值与实测值之间的误差和波动性在整个生育期内较小，其低估程度较 r_{c_I1} 模型小，在 6 月中后期至 8 月底，r_{c_I1} 模型所模拟的 ET 值稍微偏低，未能很好地模拟 ET 的峰值，相比之下 r_{c_I2} 模型很好地模拟了整个生育期 ET 的峰值，因此考虑了大气 CO_2 浓度的 r_{c_I2} 模型能够更加全面地模拟整个生长季玉米的实际蒸散量，反映其农田耗水过程。

图 6 和图 7 表明未考虑大气 CO_2 浓度和考虑大气 CO_2 浓度的两个 Irmak 模型均能够较为准确地模拟大满站整个生育期玉米冠层阻抗和蒸散量。未考虑大气 CO_2 浓度的 r_{c_I1} 模型所模拟的冠层阻抗与蒸散量和实测值之间的 R^2 分别达 0.57 和 0.97，RMSE 分别达 45.6 s·m^{-1} 和 36.8 W·m^{-2}，而考虑了大气 CO_2 浓度影响的 r_{c_I2} 模型所模拟的冠层阻抗与蒸散量和实测值之间的 R^2 分别达 0.58 和 0.97，RMSE 分别达 41.5 s·m^{-1} 和 28.4 W·m^{-2}。图 6c 和图 7c 反映了考虑大气 CO_2 浓度的 r_{c_I2} 模型能够更加真实地反映玉米在整个生育期内实际蒸散量情况，整个生育期模型低估现象较少，模拟精度更高，从 6 月 6 日到玉米的收获期，模拟值与实测值几乎一致。

玉米冠层在整个生长季由稀疏向稠密过渡，生理结构以及外界气象要素均发生了很大变化，其蒸散量变化较大，尤其是未来气候变化情景下的农田

ChinaXiv合作期刊

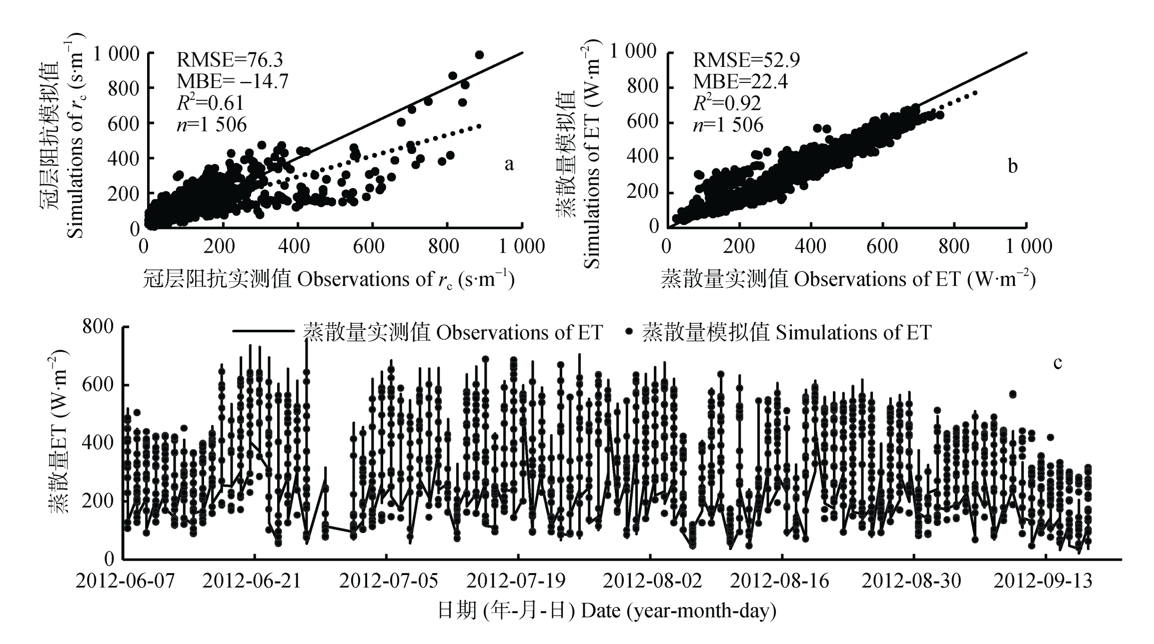


图 4　未考虑大气 CO_2 浓度的 Irmak 模型(r_{c_I1} model)对 Site 11 整个生育期内冠层阻抗(a)和蒸散量(b, c)的模拟效果

Fig. 4　Simulation results of canopy resistance (a) and evapotraspiration (ET) (b, c) with Irmak model non-considering CO_2 concentration (r_{c_I1} model) during maize growth season in Site 11

chinaXiv:201711.02121v1

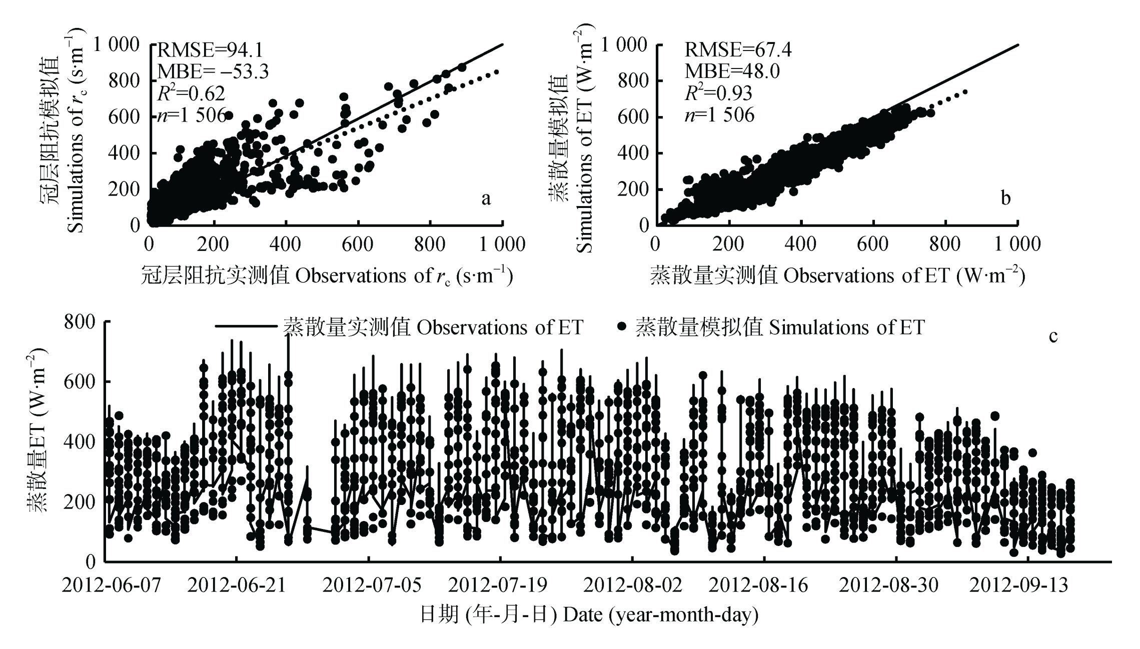


图 5　考虑大气 CO_2 浓度的 Irmak 模型(r_{c_I2} model)对 Site 11 整个生育期内冠层阻抗和蒸散量的模拟效果

Fig. 5　Simulation results of canopy resistance (a) and evapotraspiration (ET) (b, c) with Irmak model non-considering CO_2 concentration (r_{c_I2} model) during maize growth season in Site 11

蒸散变得更为复杂，因此在生态系统水碳平衡变化的模拟预测中，考虑大气 CO_2 浓度变化对冠层阻抗以及蒸散量的影响具有极其重要的作用。从图 4-7 可以看出，考虑了大气 CO_2 浓度影响的 r_{c_I2} 模型，能够更加精确地模拟玉米在生理结构、气象要素发生变化情景下冠层阻抗和蒸散量的变化，并且具有较好的空间可移植性，这在一定程度上能够为种植结构调整、土地利用方式和大气 CO_2 浓度改变情景下的玉米农田耗水过程研究提供一定的依据。

2.2　敏感性分析

由于作物自身因素以及外部环境变量的改变，冠层阻抗及蒸散量对环境变量的响应也存在较大差异，因此进一步对改进的 r_{c_I2} 模型进行敏感性分析，引入模型结果关于环境变量的敏感性系数，如下式所示：

$$S_{x_i} = \lim_{\Delta x_i \to 0}\left(\frac{\Delta R / R}{\Delta x_i / x_i}\right) = \frac{\partial R}{\partial x_i} \times \frac{x_i}{R} \tag{11}$$

式中：S_{x_i} 为模型结果关于环境变量 x_i 的敏感系数，

ChinaXiv合作期刊
chinaXiv:201711.02121v1

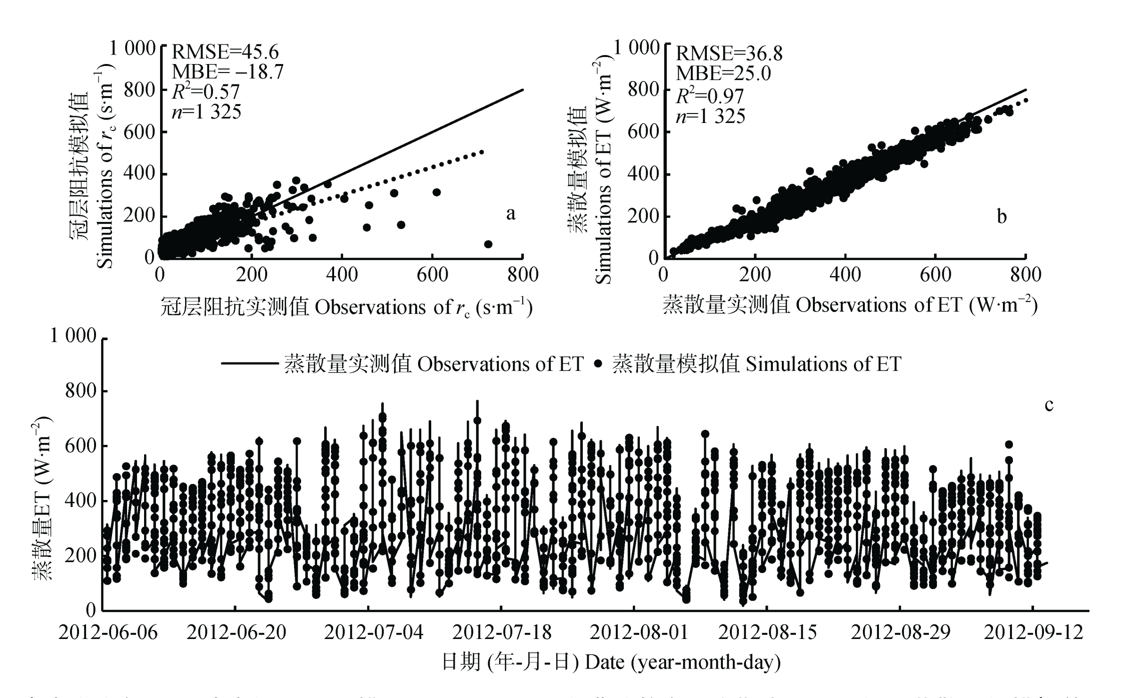


图 6 未考虑大气 CO_2 浓度的 Irmak 模型(r_{c_I1} model)对大满站整个生育期内冠层阻抗和蒸散量的模拟效果对比

Fig. 6 Simulation results of canopy resistance (r_c) (a) and evapotraspiration (ET) (b, c) with Irmak model non-considering CO_2 concentration (r_{c_I1} model) during maize growth season in Site Daman

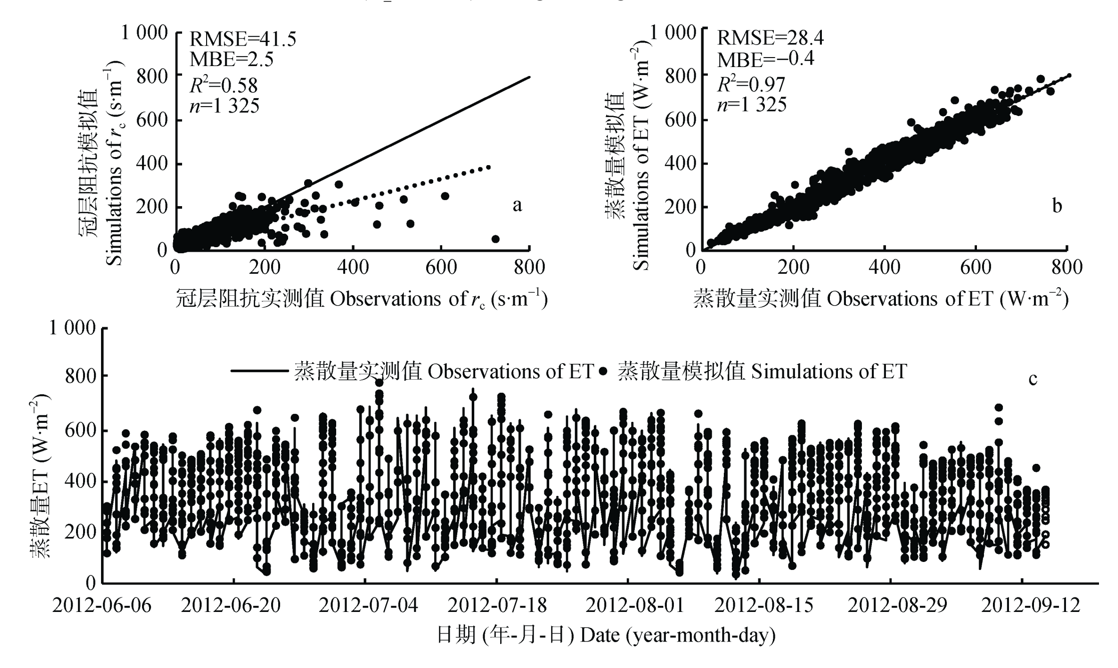


图 7 考虑大气 CO_2 浓度的 Irmak 模型(r_{c_I2} model)对大满站整个生育期内冠层阻抗和蒸散量的模拟效果对比

Fig. 7 Simulation results of canopy resistance (r_c) (a) and evapotraspiration (ET) (b, c) with Irmak model considering CO_2 concentration (r_{c_I2} model) during maize growth season in Site Daman

无量纲，可以进行模型不同环境变量敏感性的对比。当 $S_{x_i}>0$ 时，表示模型结果随环境变量 x_i 的增大而增大；当 $S_{x_i}<0$ 时，表示模型结果随环境变量 x_i 的增大而减小；$\left|S_{x_i}\right|$ 的大小反映了模型结果随环境变量 x_i 变化的敏感程度，其值越大，环境变量 x_i 对模型结果的影响越大。

由表 2 和表 3 可知，r_c 与 R_n、RH、U_3、LAI、θ、r_a 变化方向相反，随 R_n、RH、U_3、LAI、θ、r_a 的增加而减小，r_c 与 T_a 和大气 CO_2 浓度的变化一致，随着 T_a 和大气 CO_2 浓度的增加而增加。敏感系数的绝对值大小表明，r_c 对 R_n 和 RH 的变化最为敏感，其次是 θ，r_c 对 T_a、LAI 以及大气 CO_2 浓度的变化敏感性几乎一致，对 U_3 和 r_a 的敏感性最小，表明在研究区域 R_n 和 RH 是影响 r_c 的主要因子，这是因为在自然条件下，净辐射、空气温度、湿度、土壤水含量和 CO_2 浓度是影响气孔阻抗的主要影响因子[34-36]。ET 与

ChinaXiv合作期刊

表 2　环境变量变化(±5%, ±10%, ±15%, ±20%, ±30%)时冠层阻力的变化

Table 2　Variations of canopy resistance (r_c) with changes of ±5%, ±10%, ±15%, ±20%, ±30% of the environmental variables

变化率 Change rate (%)	R_n	T_a	RH	U_3	r_a	LAI	θ	CO_2
+5	−0.069	0.011	−0.056	−0.003	−0.008	−0.013	−0.040	0.012
+10	−0.133	0.023	−0.109	−0.006	−0.017	−0.026	−0.079	0.025
+15	−0.192	0.034	−0.158	−0.010	−0.025	−0.038	−0.115	0.038
+20	−0.246	0.046	−0.205	−0.013	−0.033	−0.051	−0.151	0.051
+30	−0.341	0.070	−0.288	−0.019	−0.049	−0.075	−0.218	0.079
−5	0.076	−0.011	0.060	0.003	0.008	0.013	0.042	−0.012
−10	0.158	−0.022	0.125	0.006	0.017	0.026	0.085	−0.024
−15	0.248	−0.033	0.194	0.010	0.026	0.040	0.131	−0.035
−20	0.346	−0.044	0.268	0.013	0.034	0.054	0.178	−0.047
−30	0.569	−0.065	0.433	0.020	0.052	0.082	0.278	−0.068

R_n: 净辐射; T_a: 气温; RH: 相对湿度; U_3: 3 m 高度处风速; r_a: 空气动力学阻抗; LAI: 叶面积指数; θ: 土壤有效含水量; CO_2:大气 CO_2 浓度。R_n: net radiation; T_a: air temperature; RH: relative humidity; U_3: wind speed at 3 m height; r_a: aerodynamic resistance; LAI: leaf area index; θ: water content; CO_2: air CO_2 concentration.

表 3　环境变量变化(±5%, ±10%, ±15%, ±20%, ±30%)时蒸散量的变化

Table 3　Variations of evapotranspiration (ET) with changes of ±5%, ±10%, ±15%, ±20%, ±30% of the environmental variables

	R_n	T_a	RH	U_3	r_a	LAI	θ	CO_2
+5%	0.054	−0.004	0.019	0.001	−0.002	0.004	0.014	−0.004
+10%	0.110	−0.008	0.038	0.003	−0.003	0.009	0.028	−0.009
+15%	0.166	−0.011	0.056	0.004	−0.005	0.013	0.042	−0.013
+20%	0.222	−0.015	0.074	0.005	−0.006	0.017	0.056	−0.018
+30%	0.337	−0.023	0.110	0.008	−0.009	0.026	0.083	−0.027
−5%	−0.054	0.004	−0.019	−0.001	0.002	−0.004	−0.014	0.004
−10%	−0.106	0.008	−0.038	−0.003	0.004	−0.009	−0.028	0.008
−15%	−0.158	0.011	−0.058	−0.004	0.006	−0.013	−0.042	0.013
−20%	−0.208	0.015	−0.078	−0.005	0.008	−0.018	−0.057	0.017
−30%	−0.306	0.023	−0.117	−0.008	0.014	−0.026	−0.085	0.025

R_n: 净辐射; T_a: 气温; RH: 相对湿度; U_3: 3 m 高度处风速; r_a: 空气动力学阻抗; LAI: 叶面积指数; θ: 土壤有效含水量; CO_2: 大气 CO_2 浓度。R_n: net radiation; T_a: air temperature; RH: relative humidity; U_3: wind speed at 3 m height; r_a: aerodynamic resistance; LAI: leaf area index; θ: water content; CO_2: air CO_2 concentration.

chinaXiv:201711.02121v1

R_n、RH、U_3、LAI 和 θ 的变化相一致, ET 随着 R_n、RH、U_3、LAI 和 θ 的增加而增加, ET 与 T_a、r_a 和大气 CO_2 浓度的变化相反, ET 随着 T_a、r_a 和大气 CO_2 浓度增加而减小。敏感系数绝对值大小表明, ET 对 R_n 最为敏感, 其次是 RH 和 θ, 对 T_a、LAI 和大气 CO_2 浓度的敏感性较小, 对 U_3 和 r_a 的敏感性最低, 结果表明在该研究区域 R_n 和 RH 是影响 ET 的主要控制因子, 这是因为蒸散发过程主要取决于水汽化所需能量的多寡, 水分汽化的主要动力来源于辐射和大气温度, 蒸发面与大气周围的水汽压差是决定水汽移动的因素, 而水汽的移动过程很大程度上取决于大范围的风以及蒸发面上方流动的空气。

3　结论与讨论

本研究在 Irmak 模型的基础上, 考虑了大气 CO_2 浓度变化对玉米冠层阻抗的影响, 根据前人的研究结果并假设大气 CO_2 浓度对气孔导度的影响是线性关系, 考虑微气象因子与玉米冠层阻抗之间的关系, 基于现有数据, 构建了考虑 CO_2 浓度和未考虑 CO_2 浓度影响的冠层阻抗模型, 并将其与 Penman-Monteith 模型耦合, 分析和检验了所建立的冠层阻抗模型对环境变量和大气 CO_2 浓度响应的模拟结果, 结果表明采用 LAI、R_n、RH、T_a、r_a、U_3 以及土壤有效含水量 θ, 结合大气 CO_2 浓度能够更加全面地反映冠层阻抗和蒸散量对外部环境变量的响应过程, 准确地模拟玉米在整个生育期内半小时时间尺度上的耗水过程。敏感性分析表明 r_c 和 ET 对 R_n 和 RH 的变化最为敏感, 其次为 T_a、LAI 以及大气 CO_2 浓度。本文改进的模型考虑了大气 CO_2 浓度对玉米气孔的影响, 模型参数容易获取, 模型模拟精度优于未考虑 CO_2 浓度影响的模型, 因此该模型能够为种植结构调整、土地利用方式改变以及未来 CO_2 浓度

ChinaXiv合作期刊

变化情景下的作物耗水量研究提供一定的依据。

与此同时，本文所构建的模型是基于“单源模型”，对蒸散量的模拟具有较高的精度，在早晨和下午由于水汽压差和可用能量较小，冠层阻抗波动幅度较大，模型还不能快速响应，使得部分冠层阻抗模拟精度偏低，但误差在可接受范围内。其次，文中仅考虑了 CO_2 浓度上升对玉米气孔导度的影响，并假设 CO_2 浓度对气孔导度的影响是线性的，但是并未考虑到 CO_2 浓度变化对玉米叶面积指数的影响，因此，需要在后续工作中完善。此外，受短期观测数据限制，模型中大气 CO_2 浓度对冠层阻抗(r_c)的影响系数需要根据实验资料做进一步修正。最后，由于研究区域范围较大，虽已对模型进行了独立验证，但考虑到空间复杂性和异质性，需要在已率定的经验模型的基础上对参数可移植性问题进行更加全面的考虑。

参考文献 References

[1] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy: FAO, 1998

[2] Leuning R. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C_3 plants[J]. Plant, Cell & Environment, 1995, 18(4): 339–355

[3] 张宝忠, 许迪, 刘钰, 等. 多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 8–16
Zhang B Z, Xu D, Liu Y, et al. Review of multi-scale evapotranspiration estimation and spatio-temporal scale expansion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 8–16

[4] 连晋姣, 黄明斌, 李杏鲜, 等. 夏季黑河中游绿洲样带蒸散量遥感估算[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 120–129
Lian J J, Huang M B, Li X X, et al. Evapotranspiration estimation for oasis transect in middle reach of Heihe River basin based on remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 120–129

[5] Irmak S, Mutiibwa D. On the dynamics of canopy resistance: Generalized linear estimation and relationships with primary micrometeorological variables[J]. Water Resources Research, 2010, 46(8): W08526

[6] Li S E, Hao X M, Du T S, et al. A coupled surface resistance model to estimate crop evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 2312–2323

[7] Leuning R, Zhang Y Q, Rajaud A, et al. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(10): W10419

[8] Katerji N, Rana G. Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 138(1/4): 142–155

[9] Katerji N, Rana G, Fahed S. Parameterizing canopy resistance using mechanistic and semi-empirical estimates of hourly evapotranspiration: Critical evaluation for irrigated crops in the Mediterranean[J]. Hydrological Processes, 2011, 25(1): 117–129

[10] Irmak S, Mutiibwa D, Payero J, et al. Modeling soybean canopy resistance from micrometeorological and plant variables for estimating evapotranspiration using one-step Penman-Monteith approach[J]. Journal of Hydrology, 2013, 507: 1–18

[11] Jarvis P G, McNaughton K G. Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region[J]. Advances in Ecological Research, 1986, 15: 1–49

[12] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1976, 273(927): 593–610

[13] 黄辉, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 华北平原冬小麦冠层导度的环境响应及模拟[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5209–5221
Huang H, Yu G R, Sun X M, et al. The environmental responses and simulation of canopy conductance in a winter wheat field of North China Plain[J]. Acta Ecological Sinica, 2007, 27(12): 5209–5221

[14] Li S E, Kang S Z, Zhang L, et al. Quantifying the combined effects of climatic, crop and soil factors on surface resistance in a maize field[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489: 124–134

[15] Li S E, Zhang L, Kang S Z, et al. Comparison of several surface resistance models for estimating crop evapotranspiration over the entire growing season in arid regions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 208: 1–15

[16] Zhang B Z, Kang S Z, Li F S, et al. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(10): 1629–1640

[17] Irmak S, Mutiibwa D. On the dynamics of evaporative losses from Penman-Monteith with fixed and variable canopy resistance during partial and complete maize canopy[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(4): 1139–1153

[18] Medlyn B E, Barton C V M, Broadmeadow M S J, et al. Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO_2 concentration: A synthesis[J]. New Phytologist, 2001, 149(2): 247–264

[19] Keel S G, Pepin S, Leuzinger S, et al. Stomatal conductance in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO_2[J]. Trees, 2007, 21(2): 151–159

[20] Wullschleger S D, Gunderson C A, Hanson P J, et al. Sensitivity of stomatal and canopy conductance to elevated CO_2 concentration-interacting variables and perspectives of scale[J]. New Phytologist, 2002, 153(3): 485–496

[21] Pritchard S G, Rogers H H, Prior S A, et al. Elevated CO_2 and plant structure: A review[J]. Global change Biology, 1999, 5(7): 807–837

[22] Field C B, Jackson R B, Mooney H A. Stomatal responses to

chinaXiv:201711.02121v1

ChinaXiv合作期刊

increased CO_2: Implications from the plant to the global scale[J]. Plant, Cell & Environment, 1995, 18(10): 1214–1225

[23] Ficklin D L, Luedeling E, Zhang M H. Sensitivity of groundwater recharge under irrigated agriculture to changes in climate, CO_2 concentrations and canopy structure[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(7): 1039–1050

[24] 房世波, 沈斌, 谭凯炎, 等. 大气[CO_2]和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1116–1124
Fang S B, Shen B, Tan K Y, et al. Effect of elevated CO_2 concentration and increased temperature on physiology and production of crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 1116–1124

[25] Ficklin D L, Luo Y Z, Luedeling E, et al. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2009, 374(1/2): 16–29

[26] Kang S Z, Zhang F C, Hu X T, et al. Benefits of CO_2 enrichment on crop plants are modified by soil water status[J]. Plant and Soil, 2002, 238(1): 69–77

[27] Wand S J E, Midgley G F, Jones M H, et al. Responses of wild C4 and C3 grass (Poaceae) species to elevated atmospheric CO_2 concentration: A meta-analytic test of current theories and perceptions[J]. Global Change Biology, 1999, 5(6): 723–741

[28] Kang S Z, Su X L, Tong L, et al. The impacts of human activities on the water-land environment of the Shiyang River basin, an arid region in northwest China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(3): 413–427

[29] Morison J I L, Gifford R M. Plant growth and water use with limited water supply in high CO_2 concentrations. I. Leaf area, water use and transpiration[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11(5): 361–374

[30] Easterling W E, Rosenberg N J, McKenney M S, et al. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO_2[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 59(1/2): 17–34

[31] Xu Z W, Liu S M, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE[J]. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(23): 13140–13157

[32] 刘国水, 刘钰, 许迪. 基于涡度相关仪的蒸散量时间尺度扩展方法比较分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 7–12
Liu G S, Liu Y, Xu D. Investigation on performance of evapotranspiration temporal upscaling methods based on eddy covariance measurements[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 7–12

[33] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(3): 279–300

[34] Perez P J, Lecina S, Castellvi F, et al. A simple parameterization of bulk canopy resistance from climatic variables for estimating hourly evapotranspiration[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(3): 515–532

[35] Yu Q, Zhang Y Q, Liu Y F, et al. Simulation of the stomatal conductance of winter wheat in response to light, temperature and CO_2 changes[J]. Annals of Botany, 2004, 93(4): 435–441

[36] Stannard D I. Comparison of penman-monteith, shuttleworth-wallace, and modified priestley-taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland[J]. Water Resources Research, 1993, 29(5): 1379–1392

chinaXiv:201711.02121v1